

文章编号:1000-6893(2006)06-1171-05

时-集综合的接收机自主完好性监测方法研究

孙国良¹, 孙明菡¹, 陈金平²

(1. 北京航空航天大学 204 教研室, 北京 100083)

(2. 北京环球信息应用开发中心, 北京 100094)

A Study on Time and Set Combined Method for Receiver Integrity Autonomous Monitoring

SUN Guo-liang¹, SUN Ming-han¹, CHEN Jin-ping²

(1. Faculty 204, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Beijing Huanqiu Information Developing Center, Beijing 100094, China)

摘要: 提出了将时域处理和集合统计综合实现接收机自主完好性监测的方法。对卡尔曼滤波的新息检测方法进行了数学建模,分析了其优点和缺陷,并将其与基于瞬时(Snapshot)集合冗余一致性检测的 RAIM 的方法进行综合,称之为时-集综合的接收机自主完好性监测(Time and Set Combined Receiver Integrity Autonomous Monitoring, TSC-RAIM)。计算机仿真结果表明,该方法不仅可以减少对可见星数目的要求,弥补 Snapshot RAIM 对多故障不敏感的缺陷,同时提高了故障检测的概率。

关键词: 卫星导航; 接收机自主完好性监测; 卡尔曼滤波; 故障检测

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A

Abstract: A new approach is put forward to combine the time-disposal and set-statistic for receiver integrity autonomous monitoring. Mathematic model for fault detect using the innovation of Kalman filter was described in detail. It's characters are analyzed latter. It is combined with snapshot RAIM method, which we call it TSC-RAIM(Time and Set Combined Receiver Integrity Autonomous Monitoring). Computer simulation is done to verify the validity of TSC-RAIM. The results show that this method increases the performance of fault detection, at the same time it decreases the required number of satellite in view, and compensates the weakness of snapshot RAIM for detecting multi-failure.

Key words: GNSS; RAIM; Kalman filter; fault detect

卫星导航由于覆盖区域大、定位及授时精度高,受到世界各国的广泛关注。目前,美国有 GPS 系统,俄罗斯有 GLONASS 系统,欧洲的 GALILEO 系统和日本的天顶星系统也正在建设中。中国于 20 世纪末建成了北斗一号双星通信定位系统,新一代的卫星导航系统北斗二号也正在建设中。可以预料,卫星导航将成为未来主要的导航手段。

卫星导航系统与其他的无线电导航系统一样存在完好性问题,并且在作为单一的导航手段时显得尤其重要。所谓导航系统的完善性,是指当导航系统的误差超过允许极限,不能胜任导航工作时,给出实时告警的能力。

基于瞬时(Snapshot)冗余观测的接收机自主完好性监测 RAIM(Receiver Integrity Autono-

mous Monitoring)方法,具有不需要外部支持设备,反映速度快,容易实现等特点,因此受到广泛重视。

目前常用的 Snapshot RAIM 方法是利用冗余观测量进行集合一致性检验,从而检测故障并且进行隔离或排除等。主要有奇偶空间法(Parity)、最小二乘残差和法(SSE)、最大间隔法等^[1]。其中最具有代表性的是 RTCA 推荐的 Parity 算法^[2],并且可以证明 SSE 方法与 Parity 方法在故障检测方面等价^[3]。

但是 Snapshot RAIM 方法存在一些实用上的缺点,如要求可见卫星数目较多,对多故障不敏感且监测效率低等,因此需要寻找新的方法。

1 基于卡尔曼滤波的新息检测法

从数学角度看,完好性监测实际上是一种对随机变量的假设检验。Snapshot RAIM 方法的

特点是仅仅利用当前时刻的测量数据进行集合统计检测。但是,现实中的非故障误差往往具有平稳特性和遍历性,因此,时域上表现出来的统计特性往往也能够准确反映随机变量的特征。由于 Snapshot RAIM 方法没有能够充分利用时域统计信息,因而需要较多卫星观测进行故障监测。

鉴于上述考虑,如果能够采取时域处理技术,利用历史观测信息来增加观测量冗余度,则不仅可以祛除对瞬时可观测星数目要求较多的限制,而且将提高完好性监测可用性,增强对多故障的监测能力,同时将可以获得更加鲁棒的统计检测量和检测门限。

由于卡尔曼滤波是目前工程中较实用的时域处理方法,因此本文将研究利用卡尔曼滤波器的新息(观测残差)进行故障监测的方法,并与 Snapshot RAIM SSE 方法综合进行故障监测。

1.1 新息检测法的基本出发点

假设离散线性化卡尔曼滤波器模型如下^[4]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_k &= \Phi_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{X}_k = [x \ y \ z \ v_x \ v_y \ v_z \ a_x \ a_y \ a_z \ \Delta t \ \Delta f]^T$ 为第 k 时刻的滤波器状态,包括位置(x, y, z)、速度(v_x, v_y, v_z)、加速度(a_x, a_y, a_z)、钟差和频差($\Delta t, \Delta f$); $\Phi_{k/k-1}$ 为状态方程的一步状态转移矩阵; \mathbf{W}_k 为系统驱动噪声; \mathbf{Z}_k 为观测量; \mathbf{H}_k 为观测矩阵; \mathbf{V}_k 为观测噪声。

卡尔曼滤波方法采用的是最小方差准则^[5]。根据最优估值理论可知,最小方差估计具有无偏估计特性,因此估计误差 $\tilde{\mathbf{X}}$ 的数学期望值为

$$E\{\tilde{\mathbf{X}}\} = E\{\mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}(\mathbf{Z})\} = 0 \quad (2)$$

式中: \mathbf{X} 为被估状态量; \mathbf{Z} 为观测矢量; $\hat{\mathbf{X}}(\mathbf{Z})$ 为利用观测量获得的最小方差估计值。

在卡尔曼滤波中,保持估计的零偏特性是有条件的。其中一个必要条件就是测量误差是零均值的高斯白噪声。因此,当测量中存在较大的故障时,将破坏测量误差的零均值特性,此时状态估计值也将出现偏差,这个偏差将可能为我们提供完好性监测的信息。

假设系统故障特性如下:

H0: 系统不存在故障, $E(\mathbf{V}_k) = 0$;

H1: 系统存在故障, $E(\mathbf{V}_k) = \mathbf{B}$ (\mathbf{B} 为系统故障偏差, $\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]$, n 为当前观测卫星数目)。

通过构造故障统计检测量 ξ , 并与所设定的

判决门限 T_D (见 1.3 节) 比较, 就可以确定系统是否存在故障如下:

当 $\xi \geq T_D$ 时, 假设 H1 成立;

当 $\xi < T_D$ 时, 假设 H0 成立。

实际应用中, 测量噪声为随机变量, 用户的真实位置等也是未知的, 因而无法得到状态估计值的偏差。因此, 利用卡尔曼滤波进行完好性监测的关键就是如何从卡尔曼滤波器中提取能够反映噪声偏差或估计值偏差的统计检测量。

1.2 新息检测法的统计检测量设计

当系统无故障时, 由最优估值理论可知, 滤波器估计结果将是无偏估计, 即

$$E\{\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_k\} = E\{\tilde{\mathbf{X}}\} = 0 \quad (3)$$

此时, 容易推证滤波器的新息(测量值与预测测量值之差)也将是无偏的。

$$\begin{aligned} E(\Delta \mathbf{Z}_k) &= E(\mathbf{Z}_k - \hat{\mathbf{Z}}_k) = E(\mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}) = \\ &= E(\mathbf{H}\mathbf{X}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}) + E(\mathbf{V}_k) = \\ &= \mathbf{H}E(\Phi_{k/k-1}\mathbf{X}_{k-1} - \Phi_{k/k-1}\hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \mathbf{W}_k) + E(\mathbf{V}_k) = \\ &= \mathbf{H}\Phi_{k/k-1}E(\tilde{\mathbf{X}}_{k-1}) + \mathbf{H}E(\mathbf{W}_k) + E(\mathbf{V}_k) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

若当前时刻系统出现偏差大小为 $\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]$ 的故障(假设上一时刻系统无故障), 则此时新息的数学期望值为

$$\begin{aligned} E(\Delta \mathbf{Z}_k) &= \mathbf{H}\Phi_{k/k-1}E(\tilde{\mathbf{X}}_{k-1}) + \mathbf{H}E(\mathbf{W}_k) + \\ &= E(\mathbf{V}_k + \mathbf{B}) = \mathbf{B} \end{aligned} \quad (5)$$

因此, 系统故障变差已经比较直观的表现于卡尔曼滤波器新息的统计特性上。为了具有多故障检测性能, 选取第 i 颗卫星的新息分量 $\Delta \mathbf{Z}_{k,i}$ 为统计检测量进行故障检测, 即

$$\xi = \Delta \mathbf{Z}_{k,i} \quad (6)$$

若 $\Delta \mathbf{Z}_{k,i}$ 小于故障检测门限 T_D , 则认为第 i 颗可见星没有故障; 反之, 则认为有故障。因而, 基于卡尔曼新息分量检测的方法可以对所有的可见星逐颗进行故障检测, 提高了多故障条件下的检测能力。

1.3 新息检测法检测门限 T_D 的确定

由卡尔曼滤波理论可知, 无故障时各个新息分量将服从零均值高斯分布, 概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{k,i} \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x}{\sigma_{k,i}}\right)^2} \quad (7)$$

式中: $\sigma_{k,i} = \sqrt{\mathbf{H}_{k,i} \mathbf{P}_{k/k-1} (\mathbf{H}_{k,i})^T + \sigma_v^2}$ 为新息分量方差; σ_v^2 为测量噪声方差; $\mathbf{H}_{k,i}$ 为观测矩阵 \mathbf{H} 的第 i 行元素。

当第 i 颗星出现故障时,其新息分量期望值为故障偏差 b_i , 概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{k,i} \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x-b_i}{\sigma_{k,i}\sqrt{2}}\right)^2} \quad (8)$$

无故障和有故障情况下新息分量的概率分布分别如图 1、图 2 所示。

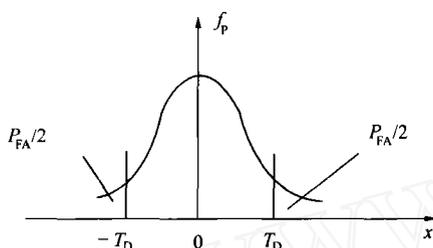


图 1 无故障时新息分量的概率分布
Fig. 1 Probability distribution density of innovation without fault

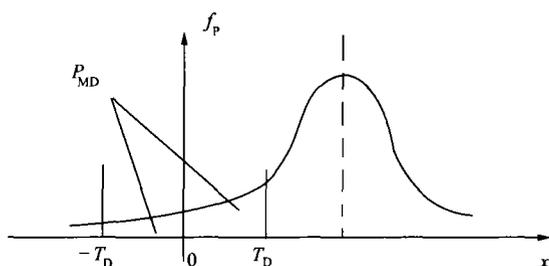


图 2 有故障时新息分量的概率分布
Fig. 2 Probability distribution density of innovation with faults

图中, T_D 为检测门限, 当 $|\Delta Z_{k,i}| > T_D$, 则认为第 i 颗卫星有故障; 反之, 则认为第 i 颗卫星无故障。

由图可知, 无故障条件下虚警概率为

$$P_{FA} = \text{erfc}\left(\frac{T_D}{\sigma_{k,i}\sqrt{2}}\right) \quad (9)$$

根据 MOPS 规定的完好性虚警概率指标 P_{FA} , 就可求得对应的检测门限 T_D ^[6]

$$T_D = \sigma_{k,i} \sqrt{2} \text{erfc}^{-1}(P_{FA}) \quad (10)$$

2 时-集综合完好性监测(TSC-RAIM)

卡尔曼滤波器新息检测法可以对每颗卫星的故障进行独立检测, 具有运算量小、在少星和多故障时仍能进行故障的检测和识别等特点。

但是单纯的卡尔曼新息检测也存在缺点, 由于滤波器的记忆效应, 对缓慢变化的斜坡故障不敏感。这主要是因为新息检测法中的统计检测量不仅与监测时刻的故障偏差有关, 还与监测时刻前的估计偏差有关。斜坡故障偏差很小时将容易

漏检, 故障星参与滤波, 导致估计结果是有偏估计。此种有偏估计将造成斜坡故障变大时检测失效或者错误, 甚至导致滤波器的发散。

而 Snapshot RAIM 方法则具有大故障下优良的检测性能。由此可见, 卡尔曼新息检测和基于瞬时(Snapshot)集合一致性检测的方法具有互补的特性。后者可以解决卡尔曼滤波对斜坡故障不敏感的问题, 而卡尔曼新息检测可以处理多故障和卫星数目较少情况。

因此可以将上述两种方法进行综合, 称之为时-集(时域处理和集合统计)综合的接收机自主监测的方法 TSC-RAIM(Time and Set Combined Receiver Integrity Autonomous Monitoring)。

时-集综合的处理规则如下:

- (1) 首先利用新息法进行序贯故障检测;
- (2) 当卡尔曼新息法检测出故障时, 以卡尔曼新息监测的结果为准;
- (3) 当卡尔曼新息法检测不出故障时, 以 Snapshot RAIM 监测结果为准。

TSC-RAIM 监测综合处理流程如图 3 所示。

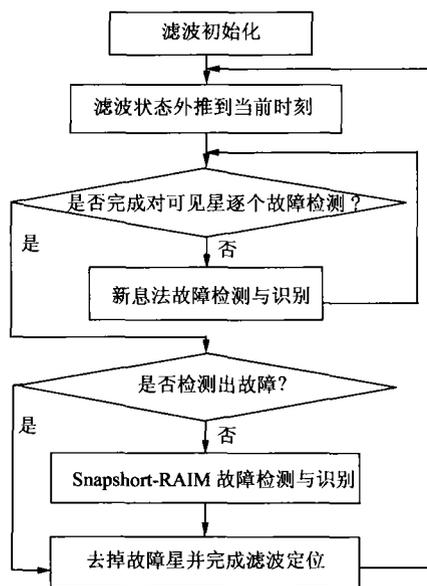


图 3 TSC-RAIM 方法监测流程图
Fig. 3 Flow chart of TSC-RAIM

3 计算机仿真实证

针对 GPS 卫星导航系统, 利用计算机对 TSC-RAIM 和 Snapshot RAIM 算法分别在单故障、少星(4 颗可见卫星)、多故障 3 种情况下进行了仿真比较。其中, 可见星选取仰角 7.5° 以上的卫星, Snapshot RAIM 算法选用 SSE 方法, 伪距误差模拟指标如表 1 所示。

表 1 仿真伪距误差构成表^[2]
Table 1 Pseudo-range errors in simulation

误差源	误差值(1 σ)/m			
	偏差	随机	总计	
空间部分	3.5		3.5	
控制部分	4.3		4.3	
用户部分	电离层延时	7.5	7.5	
	对流层延时		2.0	2.0
	多路径		1.2	1.2
	接收机噪声		7.5	7.5
	其他		0.5	0.5
SA 误差		30	30	
RSS 总计	9.3	31	32.4	

(1) 单故障条件下的完好性监测性能

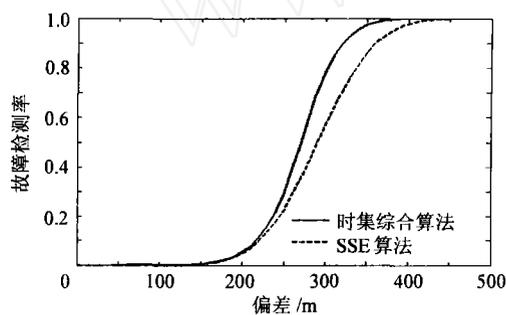


图 4 单故障条件下故障检测率

Fig. 4 Fault detect rates under single fault

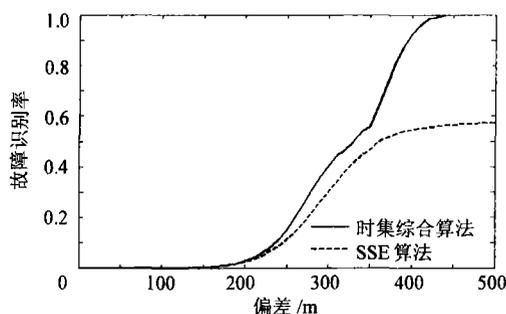


图 5 单故障条件下故障识别率

Fig. 5 Fault identify rates under single fault

由图 4 可以看出,时-集综合算法的故障检测率要高于 SSE 算法的故障检测率。时-集综合法在故障偏差增大到 420 m 时,故障检测率达到 0.999 8,满足完好性要求的最小检测率 0.999;而 SSE 算法在故障偏差增大到 430 m 时,其故障检测率才达到 0.999 1。此外,由图 5 可以看出,时-集综合法故障识别能力也优于 SSE 算法。

(2) 可见星数目较少情况的完好性监测

在仿真过程中,人为将可见星限制为 4 颗,并在其中的 1 颗卫星上设置故障,持续 5 s,然后恢复正常。

此时单纯 SSE 方法已经无法进行完好性监测,而时-集综合的 RAIM 监测虚警率为 8.03×10^{-8} ,漏检率低于 1×10^{-5} ,故障检测率随故障偏差大小的变化如图 6 所示。

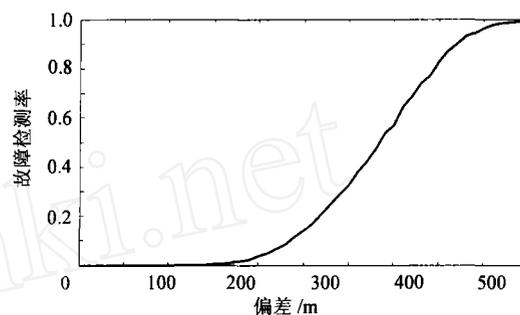


图 6 少星情况下 TSC-RAIM 方法的故障检测率

Fig. 6 Fault detect rates of TSC-RAIM with small quantity (4) of satellites in view

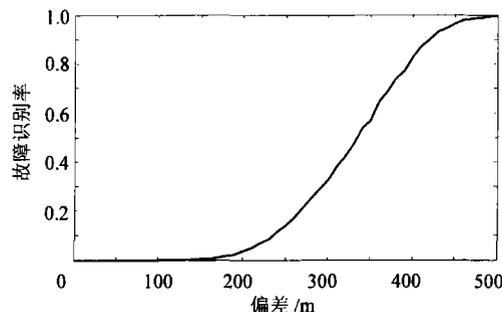


图 7 少星情况下 TSC-RAIM 方法的故障识别率

Fig. 7 Fault identify rates of TSC-RAIM with small quantity (4) of satellites in view

(3) 多故障情况的完好性监测

在仿真过程中,保证至少 4 颗可见卫星无故障条件下,人为设置 2 颗卫星故障,时-集综合的 RAIM 故障检测性能和识别性能分别如图 8、图 9 所示。

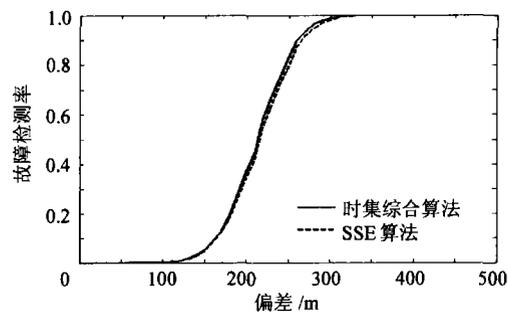


图 8 多故障情况下 TSC-RAIM 方法的故障检测率

Fig. 8 Fault detect rates of TSC-RAIM with multi-faults

可以看出:多故障条件下的时-集综合方法的故障检测率稍好于 Snapshot SSE 算法,但是其故障识别率已经远高于 Snapshot SSE 算法。

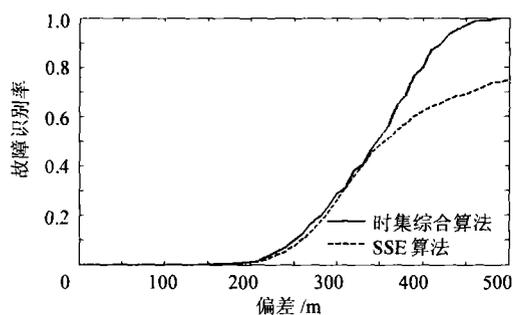


图9 多故障情况下 TSC-RAIM 方法的故障识别率

Fig.9 Fault identify rates of TSC-RAIM with multi-faults

4 结论

理论分析和计算机仿真结果表明:

(1) TSC-RAIM 充分结合了时域和集合检测的互补特性,提高了故障检测率和识别率;

(2) TSC-RAIM 利用了时域上的序贯观测,从而减小了 Snapshot RAIM 对可见星数目的要求;

(3) TSC-RAIM 的新息分量对故障不同卫星的故障进行独立检测,增强了多故障的监测性能。

参 考 文 献

- [1] Brown R G. A baseline GPS RAIM scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods[J]. Navigation, 1992, 39(3): 301-316.
- [2] 卡普兰. GPS 原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2002.
- Kaplan. Understanding GPS principle and applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,

2002. (in Chinese)

- [3] 刘准,陈哲. GPS 自主完整性检测技术研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(8): 673-676.
- Liu Z, Chen Z. Study on GPS receiver autonomous integrity monitoring[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, (29)8: 673-676. (in Chinese)
- [4] 陈炳和. 随机信号处理[M]. 北京:国防工业出版社, 1996.
- Chen B H. Random signal processing[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996. (in Chinese)
- [5] 秦永元,张洪斌,汪淑华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西安工业大学出版社, 1998.
- Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. Kalman filter and integrated navigation principle[M]. Xi'an: Xi'an Industry University Press, 1998. (in Chinese)
- [6] Lee Y, Dyke K V, Declene B, et al. Summary of RTCA SC-159 GPS integrity working group activities[J]. Navigation. Journal of The Institute of Navigation, 1996, 43(3): 307-338.

作者简介:



孙国良(1976—) 男,讲师。主要研究方向:无线电导航、多传感器组合导航、综合电子战术导航、卫星导航、通信、抗干扰,导航增强系统等。E-mail: Mrsgl@163.com

陈金平(1971—) 男,高级工程师。主要研究方向:卫星导航系统精密定位数据处理、电离层延迟监测、导航卫星精密定轨、卫星导航系统完好性监测、导航卫星自主导航等。

孙明蕊(1980—) 女,硕士研究生。主要研究方向:接收机自主完好性监测算法的研究。

(责任编辑:张利平)